

1.38 空気マイクロメータの整流作用 (第2報)

萩 原 辰 弥

The Rectifying Action of a Pneumatic Micrometer (2nd Report)

TATSUYA HAGIWARA

Synopsis

This report is concerned with experiments of a pneumatic micrometer under vibration. Maximum and minimum values of pulsating pressures are measured by a gumdiaphragm pressure gauge, and mean pressures or p_e are measured by a ordinary water-column manometer. From experimental results, the theoretical analysis mentioned in the first report is certified to be rationally applicable to practical problems.

1. 緒 言

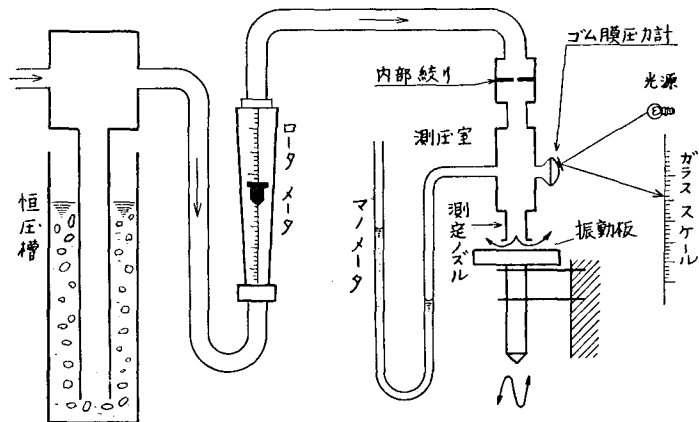
第1報¹⁾において空気マイクロメータの測定ノズルの間隙を振動させたとき系内の圧力の変動を解析し、平均圧力、最高および最低圧力を求める式を導いた。誘導の途中に逐次近似あるいは微小項の省略および n_e を求めるさいの仮定などが含まれているのでその結果がどれ程の有用性があるかを確かめる必要がある。

それで第2報では水柱マノメータで平均圧力を、ゴム膜圧力計で最高・最低圧力を測定して計算結果と比較した。前報でも述べたように本研究は空気マイクロメータの整流特性を明かにするのが目的であるので、とくに内容積の大きなしたがって応答性の悪い装置を試作して実験に用いた。この点動特性の改善すなわち応答性をよくすることに最も難点とされていた水柱マノメータはきわめて有利な計器である。

実験は計算式と比較するための第1グループと絞り径および初期間隙の影響をしらべた第2グループとにわかれる。

2. 実験装置および実験方法

装置の配置略図を第1図に示す。恒圧槽を通つて一定の圧力 p_0 に保たれた空気はロータ



第 1 図

メータ，内部絞り，測圧室および測定ノズル部の狭い間隙を通つて大気中に流れでる。 p_0 は全実験にわたつて 500 mm Aq に保たれた。ロータメータは空気の流れを直接眼で見られるように設けたので不用のときはとりはずした。流量係数 C_f は静的状態で測定された。測圧室内の圧力はゴム膜圧力計で測定された。

光源ランプで照らされたスリット像はゴム膜上に着けられた鏡に反射されてスリットスケールの上に結像される。周波数が大きくなるとスリットは光の帯のようになるが両端すなわち最高・最低圧力は十分よみとれる。ガラススケールの目盛と圧力との関係は静的な状態で校正する。スケールと鏡の距離 L を 680 mm として実験したが L は 2 m 位まで可能であり 1 mm Aq の圧力変化をスケール上約 2 mm のうごきに拡大することができる。

平均圧力は水柱マノメータで測つた。図では U 字管が示されているが実際には一脚は直径約 35 cm のタンクをおいたので他の一脚の水位だけをよんだ。液面変化の誤差は無視できる。

ノズルに対向する振動板の脚を偏心円板で揺動するレバーの上のせて振動させた。回転数は電子管式ストロボスコープによつた。振巾は装置をレバーの方向にずらせて加減し，初期間隙 h_i はホルダを上下させて変えた。

使用したノズルは内角が鋭いもの 5 種，内角に丸みのあるもの 2 種である。

第 1 実験では内部絞りの径を 1.03 mm とした。その流量係数は差圧 50~450 mm Aq にわたつて

$$C_f = 0.725 \pm 0.015$$

であつた。内部絞りは一種のオリフイス板であつてこの程度の径のものの流量係数は 0.8 前後である。そこで流量係数を 0.8 であるとして換算した d の値を内部絞りの相当径 d_e とよぶこととする。

$$d_e = \sqrt{C_f / 0.8} d \dots \dots \dots (1)$$

d_e は実際の孔径にかなり近い値をとる。上にのべた絞りでは $d_e = 0.98\text{mm}$ となる。測圧室と連結管との容積は $V_T = 78.7\text{cc}$ であったので後にのべるように、 $K = 11.12\text{kg/m}$ のゴム膜を用いると $V_e = 86.3\text{cc}$ となる。

偏心円板の 100 r. p. m. ごとに水柱マンメータとスケールの像の最大最小の位置をよんだ。後者は校正曲線によつて圧力に換算した。

第2実験では収斂圧力 p_c に対する d_e と h_i との影響をしらべた。第1実験の装置でも 1500 r. p. m. 以上になると平均圧力 p_v は一定となつて $p_v \approx p_c$ であると考えて差支えなくなるが念のため補助タンクをつけて $V_e = 819\text{cc}$ とした。

3. ゴム膜圧力計と相当容積

前川氏²⁾ はゴム膜の変形について、ゴム膜の応力あるいは伸びは全面にわたつて均一であつて面積歪 s は単位長さ当りの張力 σ と比例すると仮定している。この仮定に従えば、半径 r のゴムの円形膜についてつぎの3式が成立する。

$$p = 2kK \left[s_0 + \left\{ \frac{2(1 - \sqrt{1 - k^2 r^2})}{k^2 r^2} - 1 \right\} (1 + s_0) \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$kr = \sin \varphi \dots\dots\dots (3)$$

$$V_g = \frac{\pi}{k^3} \left[\frac{2}{3} \left\{ 1 - (1 - k^2 r^2)^{3/2} \right\} - (kr)^2 \left\{ 1 - (kr)^2 \right\}^{1/2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここで p は内圧 (ゲージ) であり、 φ は膜面の傾斜で V_g はゴム膜の膨みのため増加した容積である。

また $k = \frac{p}{2\sigma}$ [m⁻¹], $K = \frac{\sigma}{s}$ [kg/m] である。

s は面積歪をあらわし s_0 はゴム膜を張るための予張力による初期面積歪である。鏡の傾角は光学レバーで拡大されて

$$S = 2L \tan \varphi \dots\dots\dots (5)$$

となる。 S はスリット像のスケール上の移動量および L は鏡とスケールの距離である。ゴム膜の性質と厚さがわかると p と S との関係が求められる。

この実験に用いられたゴムシートは厚さ、0.170 mm 比重 0.941 の医療用ゴムシートである。円形膜を作るさいに直径 23.8 mm の円が 30.0 mm の円になるように予張力を加えたので $s_0 = 0.588$ となつた。厚さは計算によれば 0.107 mm となつたはずである。このようなゴム円形膜の中心から 7.38 mm のところに小さい鏡をはりつけ $L = 680\text{mm}$ とした。この圧力計に 300 mm Aq の内圧を加えるとスリットの動き $S = 214\text{mm}$ となつた。そこで上の式の各項を計算するとつぎのようになる。

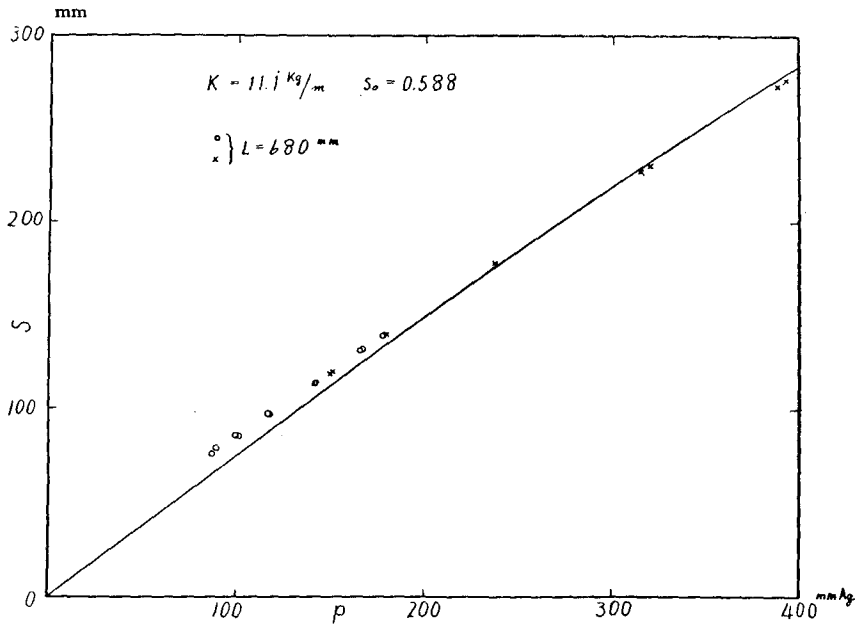
$$\varphi = 9.28^\circ \quad k = 0.02184/\text{mm}$$

$$s = 0.618 \quad K = 11.12\text{kg/m}$$

自由な状態でのゴム膜の厚さを t_0 とすると

$$K = \frac{t_0 E}{2(1-\epsilon)(1+s)} \dots\dots\dots (6)$$

である。 E と ϵ はゴム膜のヤング率とポアソン比である。ポアソン比を0.45として K から E を逆算すると、自由な状態で $E=7.2\text{kg/cm}^2$ 内圧300 mm Aqがかかったときで $E=11.7\text{kg/cm}^2$ となる。ゴムの E の直接測定は行わなかったが大體10~15 kg/cm^2 といわれており、伸びの増加によつて E が増大することがわかっているのて上記の値は妥当と考えられる。



第 2 図

第2図は $K=11.1\text{kg/m}$ として(2)・(3)および(5)式から、 p と S の関係を計算で求めたものである。計算値はきわめて直線に近い線となる。図に実験値を記入したが傾斜に若干の差が見られる。これは K が定数でなくて内圧によつて多少変るべきことを示している。しかし圧力計の大體の性能を予想するためには上に述べた計算法が十分役に立つことが認められる。

ゴム膜が膨んだための容積増加率を α_v とすると $\alpha_v = dVg/dp$ であるので(4)式から $kr \ll 1$ として微小項を省略すれば

$$\alpha_v = -\frac{\pi r^4}{8k} \left\{ 1 + (kr)^2 \right\} \left[s_0 + \left\{ \frac{3}{4} + \frac{5}{8} (kr)^2 \right\} (kr)^2 (1 + s_0) \right]^{-1} \dots\dots\dots (7)$$

が得られ上記の数値を入れると

$$\alpha_v = 28.5\text{cc/kg/cm}^2$$

となる。ゴム膜圧力計の K はゴムの質によつて異なることはもちろんであるが、長時間の使用によつても変るのでないかと思われる。また予張力を与えるときその量の制御は困難である

し伸びが全面にわたつて均一であるかどうかとも疑わしい。それで新規張りかえのときばかりか使用中できるだけ頻繁に校正することが望ましい。

相当容積はつぎのようにして求める。いま容積 V_t の測圧室内に ΔV の空気が流れこんで圧力が ΔP だけ高くなつたとすると

$$\frac{V_t + \Delta V}{v} = \frac{V_t + a_v \Delta P}{v + \Delta v}$$

v は空気の比容積である。ポルトローブ変化の指数を m とすると状態式は

$$Pv^m = \text{const} \quad \text{あるいは} \quad \frac{\Delta P}{P} + m \frac{\Delta v}{v} = 0$$

である。また第1報での V_e の式は

$$\Delta V = \frac{V_e}{P} \Delta P$$

と仮定したのでこれらの3式から

$$V_e = \frac{V_t}{m} + a_v P \quad \dots\dots\dots (8)$$

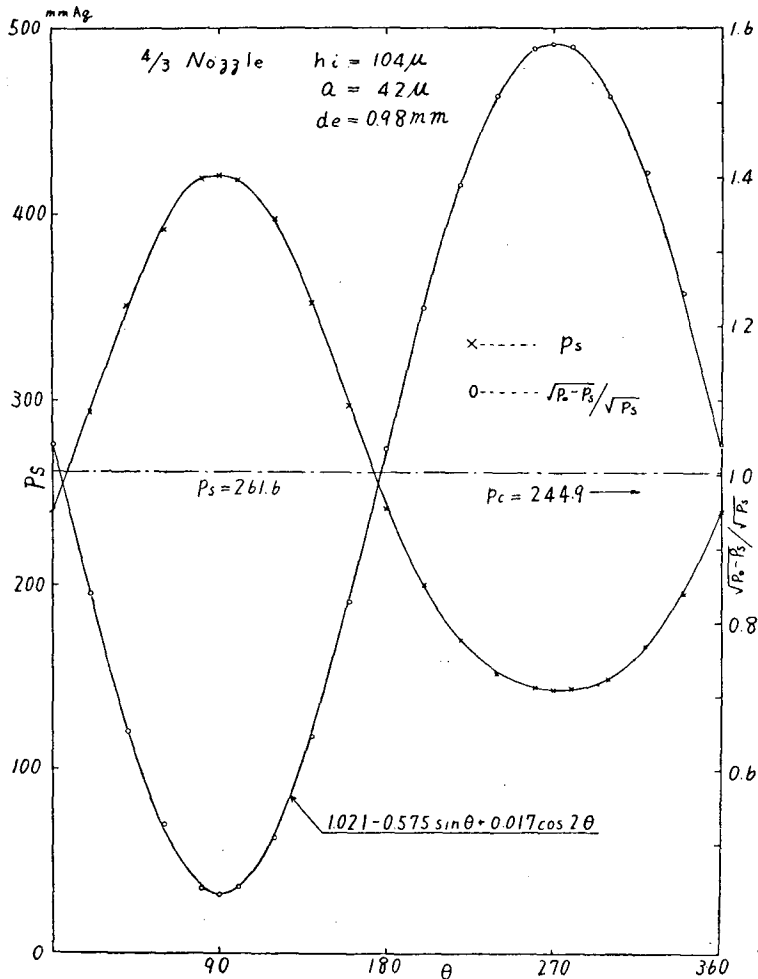
が得られる。実験の結果は $m=1.4$ を用いるのが最も適當であることを示した。

4. 第一実験の結果

4/3 ノズル, $h_i=104 \mu$ および $a=42 \mu$ の場合の静的状態の圧力 p_s と $\sqrt{p_0 - p_s} / \sqrt{p_s}$ を第3図に示す。後者は $\sin \theta$ の2次式で十分満足できる近似が得られる。 $p-Q$ 特性を実験によつて求めその結果得られた n の値をもとにして n_e を計算して $n_e=0.45$ を得た。 n の値が0.5以下になるのはノズルの内角が鋭いためノズルの入口で縮流がおこり流量がますに徒がつて縮流による抵抗が次第に大きくなることに原因がある。流量がさらに増すと縮流による抵抗変化の割合は0に近くなるので n は再び0.5に近ずきはじめる。 $n_e=0.45$ に対し比例定数 $k'=-0.10$ となる。計算の結果 $p_s=261.6 \text{ mm Aq}$, $(p_e)_{0.45}=244.9 \text{ mm Aq}$ となるので $\delta=16.7 \text{ mm Aq}$ だけ平均圧力が下がる。

第4図は $(p_m)_{\text{ext}}$ および p_v の実験値と計算値を示す。水柱マノメータの水面の振動は400 c. p. m. になるとほとんど認められなくなり, 1,300 c. p. m. 以上では位置が変らなくなつた。これらのサイクルの値は h_i あるいは a によつて違つてくるがほぼ同程度の値であつた。600 c. p. m. 以上でなお水面の振動が認められた例はごく稀であつた。 p_v の実験値と計算値はよく一致している。 p_{max} と p_{min} の値は p_v ほど一致していない。計算に省略の多かつたこと, 測定精度が p_v ほどよくないことなどを考慮すればこの程度の差は仕方ないと思う。

1,000 c. p. m. 以上では $p_v = \frac{1}{2} (p_{\text{max}} + p_{\text{min}})$ となつている。これは $(p_m)_{\text{ext}}$ が $\pm \cos \varphi_1$ の項だけで表わされ得ることを示している。 $(p_m)_{\text{ext}}$ の値も1,500 c. p. m. 以上ではきわめてよく一致する。



第 3 図

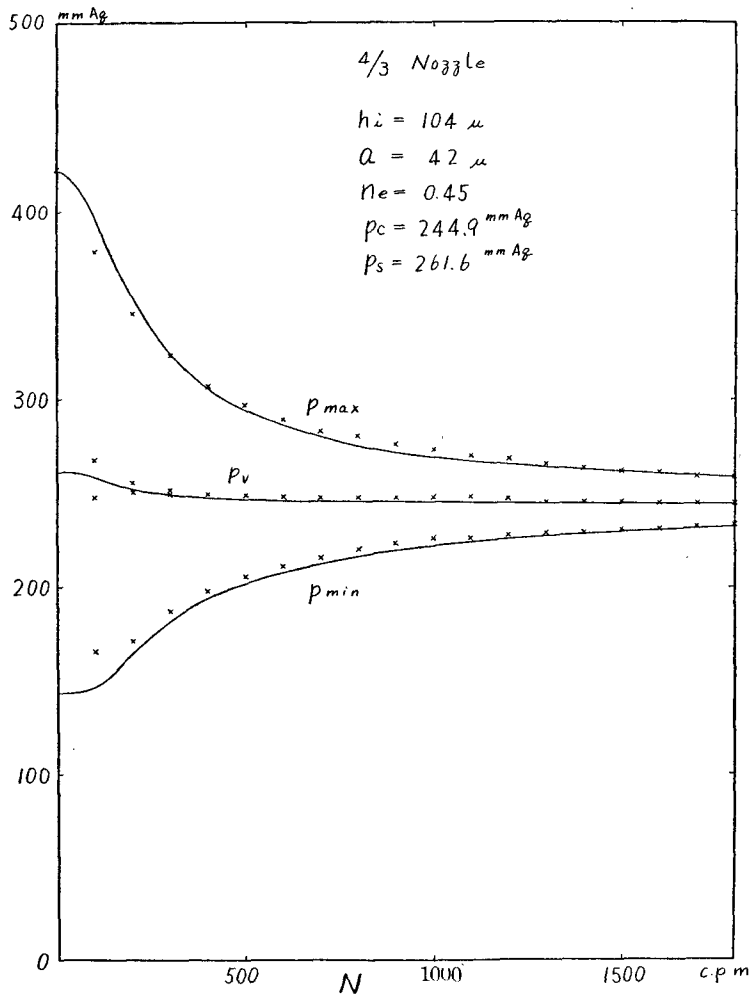
第5図に p_v の例を示す。 p_v は周波数の増加に伴って高くなる場合と低くなる場合がある
 これは第1報 (37) 式で示した δ の符号によるので p_v の上昇すなわち $\delta < 0$ の限界は

$$\bar{p}_s > \frac{2}{2n-1} \left(n - \sqrt{\frac{n}{2n+1}} \right) p_0 \dots\dots\dots (9)$$

となる。 $p_0 = 500\text{mm Aq}$ とすると $n = 1/2$ のときは $\bar{p}_s > 375\text{mm Aq}$ および $n = 1$ のときは
 $\bar{p}_s > 424.5\text{mm Aq}$ が得られる。 n の小さい方が δ が負になりやすい。図の条件は (a) (b) 共

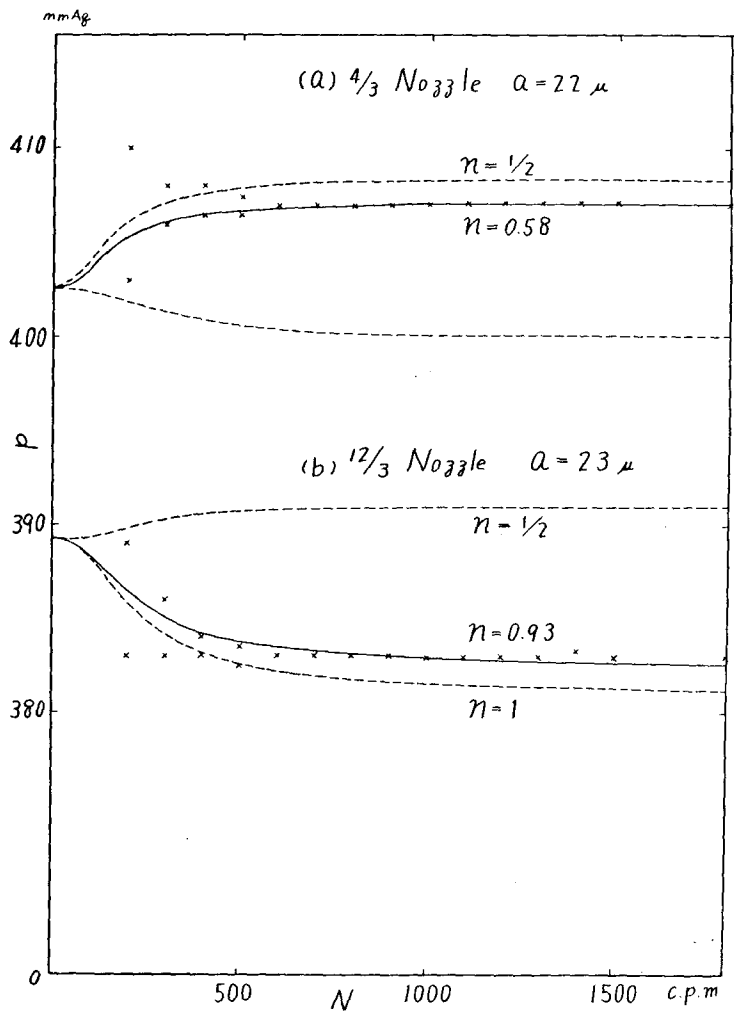
$$375 < \bar{p}_s < 424.5$$

であるから $n = 1/2$ のときに p_v は高くなり $n = 1$ のときは低くなる。振巾が 20μ 程度ならばノズルの如何に拘らず計算値と実験値とはよく一致する。データを第1表に示す。



第 4 図

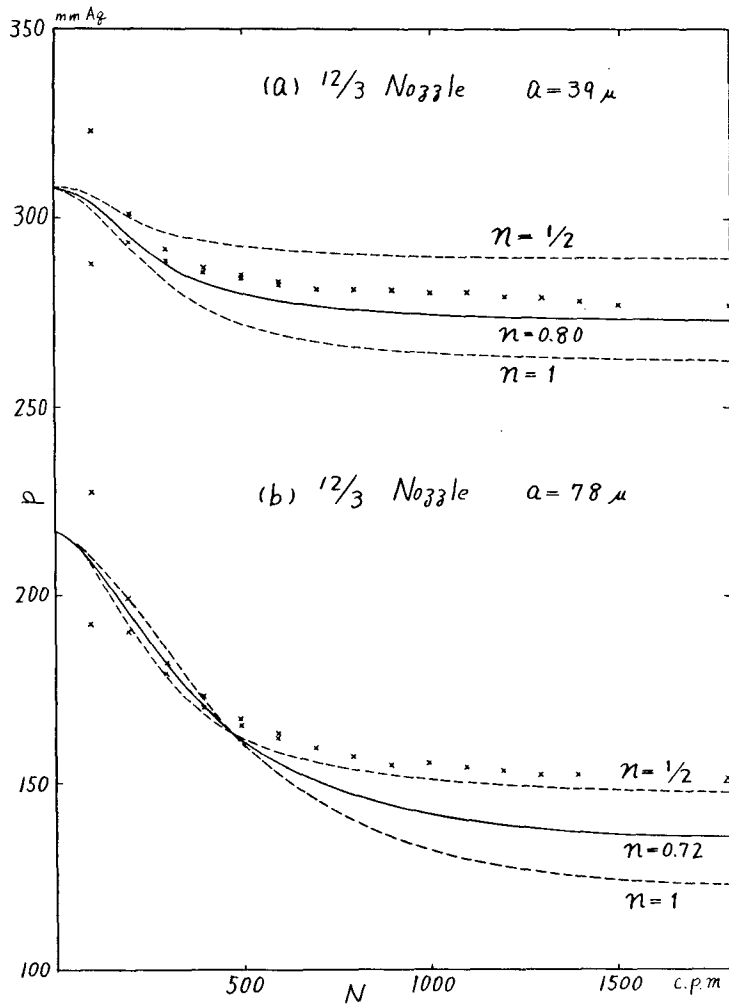
12/3 ノズルを用い第2表に掲げたデータで行った実験の結果を第6図に示す。この場合振巾がまずつれて計算値との差が大きくなる。また第4図と比較すると振巾が同じでもノズルの鏝が広くなると差が大きくなることがわかる。この原因は計算では勘定されていない縮流現象に影響されたためである。もちろん4/3 ノズルの場合も縮流がおこるが、鏝が狭いときは流れは縮んだままノズルの周辺から吹き出す。それでこの流量特性は n の値だけではあらわされると考えられる。一方鏝の広いノズルでは一度縮んだ流れは再び拡がつて間隙をみたした後に周辺から吹き出す。縮流部分がポケット状になつてノズルの間隙の内部に包みこまれているので、この部分が間隙の振動によつて複雑な影響をうけることが予想される。この効果は n の値だけではあらわしきれない。このポケット状の流れの存在については



第 5 図

第1表 第5図のデータ

	Nozzle	h_i (μ)	a (μ)	\bar{p}_s (mmAq)	n	p_c (mm Aq)	τ (sec)
a	$4/3$	40	22	402.5	$1/2$	408.5	0.0527
					1	400.0	0.0450
b	$12/3$	60	23	389.3	$1/2$	391.0	0.0550
					1	381.2	0.0454



第 6 図

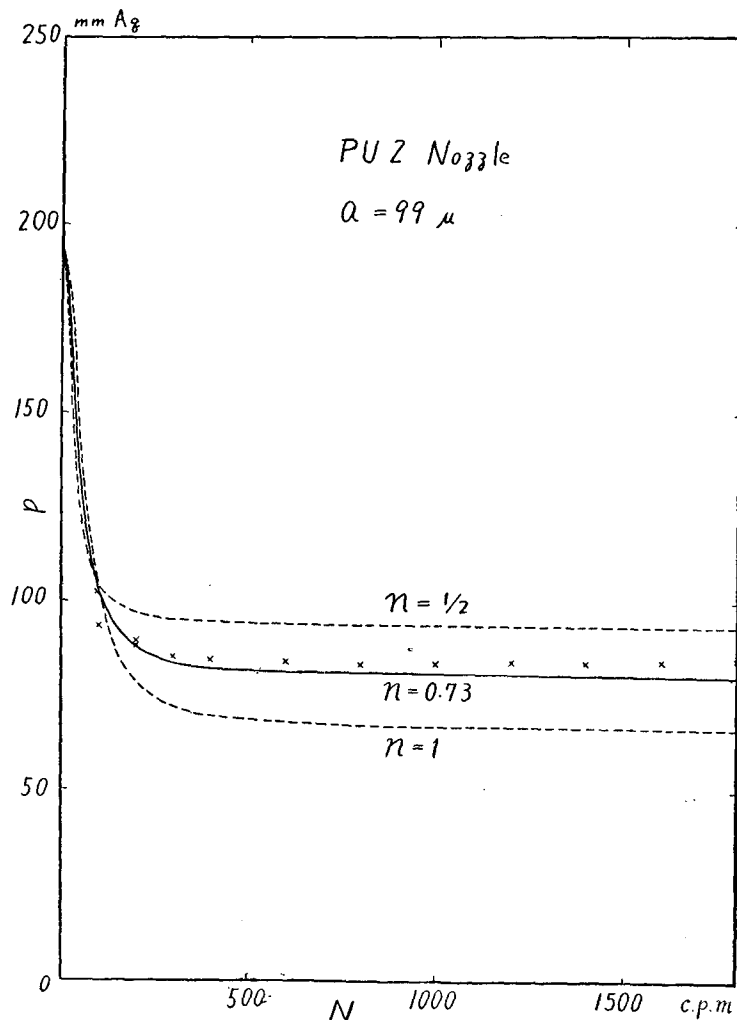
第2表 第6図のデータ

	h_i (μ)	a (μ)	\bar{p}_s (mmAq)	n	\bar{p}_c (mm Aq)	τ (sec)
a	81	39	307.9	1/2	289.2	0.0566
				1	261.9	0.0383
b	111	78	216.7	1/2	145.8	0.0370
				1	115.8	0.0173

すでに石原氏³⁾が論及しておられる。筆者も圧力分布の測定によつてその存在を確めた。

縮流は空気マイクロメータの静特性に対してもまた整流特性に対しても悪い影響を与えるだけであるからこれを除くことに努力しなければならない。

そこで内角に丸みをもつた *PU2* ノズルによる実験を行つた。データを第3表に示す。



第 7 図

第3表 第7図のデータ

h_i (μ)	a (μ)	\bar{p}_s (mm Aq)	n	\bar{p}_c (mm Aq)	τ (sec)
134	99	193.2	1/2	93.7	0.228
			1	66.9	0.109

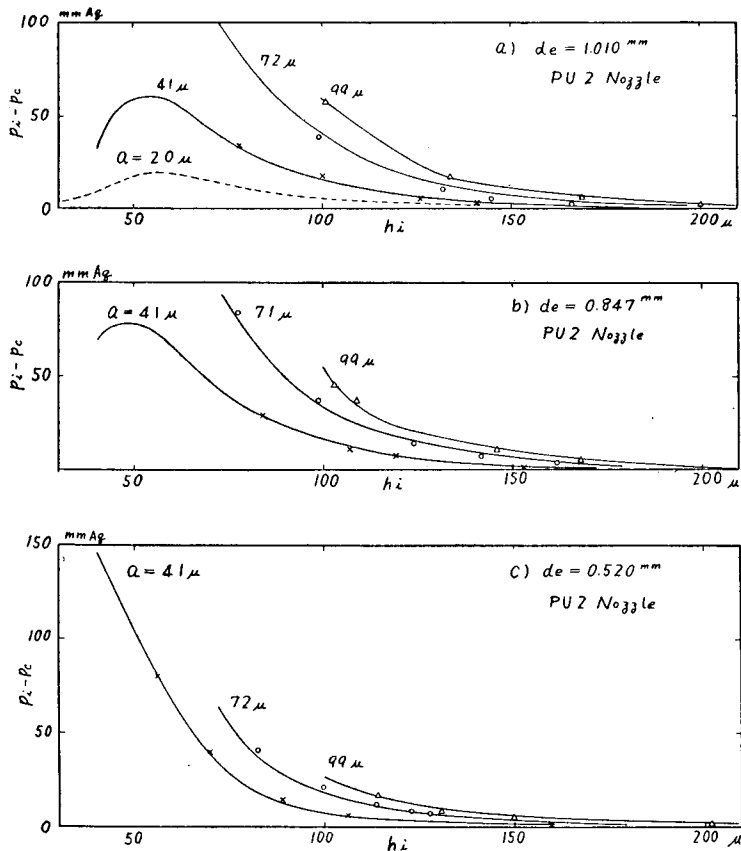
ズルの内外径比は約3で0.3mmの丸みがついている。このとき $V_e = 819 \text{ cc}$ とし $d_e = 1.01 \text{ mm}$ を用いたので $q = 3.105 \times 10^{-2} [\text{mkg}^{-1/2} \cdot \text{sec}]$ となり前の実験より応答おくれが約10倍大きい。第7図はその結果であつて p_v は N の小さいところで急激に減少し N が 600 c. p. m になるとほとんど変らなくなる。

振巾が大きくなつたにも拘らず実験値は計算値にきわめて接近しその差は 3 mm Aq 以内となつた。これを見てもノズルの内角の丸みの効果がいかに大きいかがわかる。

5. 第二実験の結果

$V_e = 819 \text{ cc}$ とし d_e を 2.04~0.52mm の5種類, a は 41 μ , 72 μ および 99 μ の3種類とした。 h_i を適当にかえ p_c を測定した。 $d_e = 2.04 \text{ mm}$ のとき $q_{\min} = 0.76 \times 10^{-2} \text{ mkg}^{-1/2} \text{ sec}$ になつたが 1,000 c. p. m. 以上では $p_v = p_c$ が成り立つので, 1,000 c. p. m. の p_v をよんだ。初期間隙 h_i に対応する圧力を p_i とすると

$$\Delta p_v = p_i - p_c$$



第 8 図

が直流圧力分として得られる数値である。PU2 ノズルを用いた実験結果の一部を第8図に示す。実線は第1報に従つて求めた計算値であつて全般にわたつて実験値とよく一致している。(c)図の場合 h_i の大きいところで多少の差が認められるがこの条件では p - h 静特性の感度がきわめて小さくなり、 p_i を測定して h_i を求める方法では h_i の値の評価が困難になる。上記の誤差は h_i の値を決定するときの誤差から生じたもので計算方法の有用性を損うものではない。

h_i が大きくなると Δp_v は一般に小さくなるが a が小さいと極大が生ずる。この現象は d_e が小さくなると次第に消える。 a が大きいときは d_e の大きい方が Δp_v が大きい a が小さくなると d_e の小さい方が Δp_v が大きくなる。このように Δp_v は a , d_e あるいは h_i によつて変る。

6. 結 言

第1報で行つた理論解析の結果を確認するため $(p_m)_{\text{ext}}$ および p_v の測定を行つた。その結果予期したように N の小さい場合の $(p_m)_{\text{ext}}$ の値は十分な近似が得られなかつたが、 p_v および N の大きい範囲での $(p_m)_{\text{ext}}$ の値は計算値と きわめてよく一致した。ただ内角に丸みのないノズルでは縮流にわずらわされるからノズルの内角には必ず丸みをつけなければならない。

d_e , h_i および a をかえて実験した結果 p_v の計算式が実験された範囲では実用上成立することが認められた。

第1報で述べられた方法は 動的状態では 静的に求められた関係が保たれながら連続的に変化しているという考え方を基礎にしている。間隙が振動している場合流れの機構を変える動的効果が存在することは想像される。しかしたとえば第6図の(a)および(b)の条件で流体のある部分がノズルを通り抜ける平均の時間はそれぞれ $5.1 \times 10^{-4} \text{sec}$ および $5.8 \times 10^{-4} \text{sec}$ である。この時間内の間隙の変化は 600 c. p. m. のときそれぞれ 0.25μ と 0.90μ になり h_i に比べると 1/250 および 1/87 となる。このように僅な変化が第6図に示されるような大きな差を説明できるとは考えられない。周波数がきわめてたかく (たとえば 1000 c. p. s.) なければ音響学的な取扱いを要するが本実験の周波数範囲では上に述べた基本的考え方が成立するものとする。 d_e , h_i および a の影響については総合的に次報にのべる。

この研究は明治大学工学研究所費の助成をうけた。

参 考 文 献

- 1) 筆者：本研究報告 p. 24 (237)
- 2) 前川道治郎：「絞り流量計による脉動気流の測定」日本機械学会論文集, Vol. 2 (1936), No.6, p. 86.
- 3) 石原誠一郎：「空気マイクロメータの性能向上に関する研究」日本機械学会論文集, Vol. 20 (1954), No. 93, p. 86.